

林火灾区生态环境时空恢复格局分析

——以凉山州为例

杨鸿辉,余 娇,吴 钺,尹金龙,丁 铮*

(福建农林大学 艺术学院/园林学院,福建 福州 350100)

摘 要:森林火灾严重影响生态系统及景观风貌,利用遥感技术定量评价受灾区生态环境质量恢复程度对促进灾后重建工作及社会经济可持续发展具有重要意义。利用 GEE(Google earth engine)平台获取凉山州 2000、2010、2020 年 Landsat 系列遥感影像并提取绿度(NDVI)、湿度(WET)、热度(LST)和干度(NDBSI)4 个生态指标,通过主成分分析耦合上述指标构建遥感生态指数模型(RSEI)对研究区生态环境质量进行评价,同时使用地理探测器对凉山州生态环境质量变化进行驱动因子分析。结果表明:1)2000—2020 年凉山州生态环境质量呈“先降后升”趋势,RSEI 均值从 0.53(2000 年)下降到 0.51(2010 年),后上升至 0.55(2020 年),生态等级为一般及以上的面积占比为 68.12%;2)凉山州生态环境质量呈差和较差的区域多集中于西部的盐源县,南部的会理县、会东县,中部的越西、喜德、昭觉、美姑、普格、布拖、金波、西昌 8 县等;3)生态环境质量最佳区域多集中于海拔 3 831~4 624 m、坡度 39°~51°和正北坡向等地;4)单因子探测结果为干度指标>绿度指标>湿度指标>热度指标>土地利用类型>高程>坡度>经济密度>人口密度,且各因子在交互作用后对 RSEI 的空间分异解释力均得到增强。

关键词:凉山州;Google Earth Engine;遥感生态指数;地理探测器;驱动力分析

中图分类号:S762.1

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)03-0138-08

Spatial-Temporal Restoration Pattern of Ecological Environment in Forest Fire Area:
A Case Study of Liangshan Prefecture

YANG Hong-hui, YU Jiao, WU Yue, YIN Jin-long, DING Zheng*

(College of Arts/College of Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, Fujian, China)

Abstract: Forest fires seriously affect the local ecosystem and landscape, and the use of remote sensing technology to quantitatively evaluate the degree of ecological environment quality restoration in the affected areas is of great significance to promote post-disaster reconstruction work and sustainable social and economic development. Based on the GEE (Google Earth Engine) platform, this study obtained the remote sensing images of the Landsat series in Liangshan Prefecture in 2000, 2010 and 2020 and extracted four ecological indicators of greenness (NDVI), humidity (WET), heat (LST) and dryness (NDBSI), and evaluated the ecological environment quality of the study area by coupling the above indicators through principal component analysis and coupling of the above indicators. At the same time, geographical detectors were used to analyze the driving factors of the changes in the quality of the ecological environment in Liangshan Prefecture. The results showed that 1) from 2000 to 2020, the ecological environment quality of Liangshan Prefecture showed a trend of "first falling and then rising", and the average RSEI decreased from 0.53 (2000)

收稿日期:2022-04-21 修回日期:2022-05-15

基金项目:福建省科技创新智库课题研究项目(FJKX-A2008)。

第一作者:杨鸿辉。研究方向:景观格局。E-mail:1390700949@qq.com

*通信作者:丁 铮,教授,硕士生导师。研究方向:景观规划与设计。E-mail:dz0591@126.com

to 0.51 (2010) and then to 0.55 (2020), and the area with ecological grade of average or above accounted for 68.12% of the area. 2) The areas with poor and poorer ecological environment quality in Liangshan Prefecture were mostly concentrated in Yanyuan County in the west, Huili County and Huidong County in the south, and Yuexi, Xide, Zhaojue, Meigu, Puge, Butuo, Jinbo and Xichang eight counties in the central part. 3) The areas with the best ecological and environmental quality were mostly concentrated in places such as altitude of 3 831–4 624 m, slope of 39°–51° and due north slope. 4) The results of the one-factor detection were dryness index > greenness index > humidity index > heat index > land use type > elevation > slope > economic density > population density, and the spatial differentiation interpretation of RSEI by each factor was enhanced after interaction. The study shows that although the overall quality of the ecological environment in Liangshan Prefecture has improved in recent years, the ecological restoration work in some areas still needs to be strengthened, and in the future, it is necessary to strictly prevent high-risk areas of forest fires and control the development of urbanization.

Key words: Liangshan Prefecture; Google Earth Engine; remote sensing ecological index; geodetector; driving force analysis

良好的生态环境是社会、经济、文化可持续发展的基础保证^[1]。凉山州作为四川省内三大林区之一,林业用地面积占全州土地面积 66.56%,是长江上游生态屏障建设的重要组成部分,具有涵养水土、生物多样性保护等一系列重要生态功能。但凉山州高密度森林覆盖率也使其成为四川省林火高发区,依据《全国森林火险区划等级》(LY/T 1063–2008)划分,凉山州共有 12 个 I 级火险单位,约占全省 I 级火险单位 1/8^[2]。据资料统计,自新中国成立以来凉山州共发生 5 千多起森林火灾,受灾面积高达百万亩^[3],生态系统及生物多样性受到严重破坏,2019 年凉山州木里县及 2020 年凉山州西昌市特大森林火灾更使得凉山州备受社会关注。因此,为精准推进凉山州灾后生态重建工作,保护长江经济带绿色可持续发展,研究凉山州生态环境质量时空演变特征及其主导因子具有重要意义。

由于卫星遥感能够快速、实时获取大面积地表数据,近年来已被广泛应用于多学科领域^[4–5]。但大多数研究只基于单一指标评价生态环境质量,而生态环境作为多因素结合体^[6],单一指标难以全面、客观反映多因素作用下的生态环境质量。徐涵秋^[7]提出遥感生态指数(RSEI),通过主成分分析根据绿度(NDVI)、湿度(WET)、热度(LST)和干度(NDBSI)对第 1 主成分贡献度进行权重赋值^[8],因此所构建的遥感生态指数模型更为客观,已被广泛应用于河流域生态评价^[9–10]、城市群生态评估^[11–12]等。

鉴于目前对凉山州进行长时间序列生态环境质量恢复评价较为缺乏,而且通过传统遥感软件如 ENVI (environment for visualizing images)等构建大尺度区域 RSEI 模型处理步骤繁杂,工作效率较低^[13],本研究借助 GEE(Google earth engine)平台

高效的地理数据处理能力,对凉山州 2000、2010、2020 年 Landsat TM/OLI 卫星遥感影像进行影像预处理及数据计算,构建各年份 RSEI 模型,并根据计算结果对凉山州 2000–2020 年生态环境质量进行综合评价分析。同时,为进一步探析凉山州生态环境质量变化成因,引入地理探测器揭示其背后驱动力并分析不同因子间交互作用,以期凉山州未来生态环境恢复建设提供理论支撑,筑牢长江上游重要生态屏障。

1 研究区概况

1.1 研究区概况

凉山州(26°03′–29°18′N,100°03′–103°52′E)位于四川省西南部,全州面积 60 423 km²,地处四川盆地和云南省中部高原之间,地势西北高,东南低,地表起伏变化大(图 1)。属亚热带季风气候区,干湿分明,11 月至次年 4 月为干季,5–10 月为湿季,州内地形的复杂性形成了多种局部大气环流形势,进而导致了凉山州多样的气候格局,呈“一山有四季,十里不同天”的复杂气候景象。

1.2 数据来源与预处理

采用的卫星遥感影像均来源于美国地质调查局(USGS),并利用 GEE 平台分别筛选 2000、2010、2020 年相同季相的共 278 景 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 卫星遥感影像,影像皆已通过大气校正、辐射定标等数据预处理过程,云量均低于 10%,分辨率为 30 m。此外,为避免研究区原有水域对湿度指标影响,采用 MNDWI 水体指数掩膜水体信息,以确保湿度指标可以准确代表研究区湿度条件。其余数据来源及预处理见表 1。

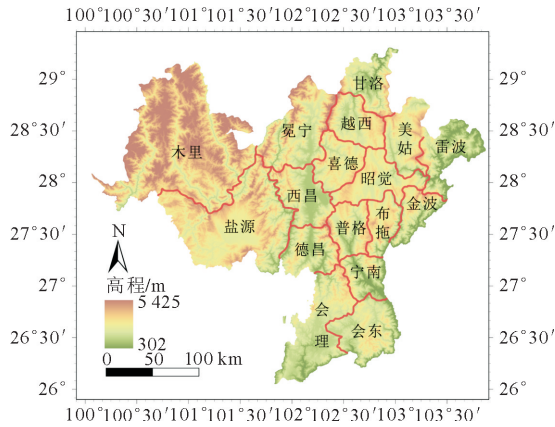


图 1 凉山州高程图

Fig. 1 Elevation map of Liangshan Prefecture

2 研究方法

2.1 基于 GEE 平台的评价指标计算

GEE 平台是由美国肯塔基大学与美国地质调查局联合开发的非营利性平台^[14],常用于地理信息

数据可视化处理,该平台储备了海量的历史遥感影像及地理数据,免去了大气校正、辐射定标等数据预处理过程^[15]。由于凉山州属暖温带湿润气候区,夏半年云雨较多,冬半年温暖少雨,加之州内各地呈立体气候,导致年度 Landsat 序列遥感影像集中无云的图像较少,而且无云影像时间段不固定。因此,本研究使用 GEE 平台中 Landsat 云掩膜算法,该算法能检测并去除遥感影像中云阴影,并对去云后的区域填补同年无云影像,从而得到该研究区最优的卫星遥感影像。绿度、湿度、干度、热度 4 个指标的运算过程见表 2。

2.2 遥感生态指数计算

经 GEE 处理后获得绿度、湿度、干度、热度 4 个指标,再通过主成分分析(PCA)构建 RSEI 模型,以此直观反映研究区生态环境质量(表 2)。同时,由于各指标的计量单位均不一致,需对各指标进行归一化处理,计算如下。

表 1 数据来源及预处理

Table 1 Data source and pre-processing

名称	来源	时间	分辨率	预处理
航天飞机雷达地形测绘使命(SRTM)	https://www.gscloud.cn/	2000、2010、2020 年	90 m	计算坡度、坡向,影像裁剪
年平均气温	四川省统计年鉴	2000—2020 年	—	/
年平均降水	四川省统计年鉴	2000—2020 年	—	/
经济密度	https://www.resdc.cn/	2015 年	1 km	影像裁剪
人口密度	https://www.resdc.cn/	2020 年	1 km	影像裁剪
土地利用类型	https://www.resdc.cn/	2020 年	1 km	影像裁剪

表 2 各指标计算方法

Table 2 Indicators calculation methods

指标	计算方法
绿度	$N_{DVI} = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red})$
湿度	$W_{ETM} = 0.0315\rho_a + 0.2021\rho_g + 0.3102\rho_r + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2}$ $W_{ETOL} = 0.1511\rho_B + 0.1972\rho_G + 0.3283\rho_R + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2}$
热度	$L_{ST} = T_b / \left[1 + \left(\frac{\lambda T_b}{\rho} \right) \epsilon \right] - 273.15$ $T_b = K_2 / (K_1 / L_6 + 1)$ $L_6 = g_{sin} \times D_N + b_{ias}$
干度	$I_{BI} = \{2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [\rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_R) + \rho_G / (\rho_G + \rho_{SWIR1})]\} / \{2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + [\rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_R) + \rho_G / (\rho_G + \rho_{SWIR1})]\}$ $S_1 = \frac{[(\rho_{SWIR1} + \rho_R) - (\rho_B + \rho_{NIR})]}{[(\rho_{SWIR1} + \rho_R) + (\rho_B + \rho_{NIR})]}$ $N_{DSI} = (I_{BI} + S_1) / 2$

注: N_{DVI} 为归一化植被指数; L_{ST} 为地表温度; N_{DSI} 为归一化土壤指数; I_{BI} 为建筑用地指数; S_1 为裸土指数; ρ_{red} 、 ρ_B 、 ρ_G 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 分别对应 TM 和 OLI 遥感影像红外光、蓝光、绿光、红光、近红外光、短波红外 1、2 波段的反射率; λ 为热红外中心波长;玻尔兹曼常数 $\rho = 1.438 \times 10^{-2}$ mK; ϵ 为地表比辐射率; K_1 和 K_2 为定标参数; T_b 为亮度式; D_N 为像元灰度值; g_{sin} 为波段增益值; b_{ias} 为偏差值; L_6 为 Landsat 热红外波段的辐射值。以上参数均参考自文献^[16]。

$$N_{I_i} = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (1)$$

式中: N_{I_i} 为归一化处理后的指标值; I_i 为指标值; I_{\max} 、 I_{\min} 分别为该指标的最大值和最小值。

经过归一化处理后的 4 个指标在 GEE 平台进

行主成分计算后获取初始遥感生态指数 R_{SEI0} :

$$R_{SEI0} = 1 - \{P_{C1} [f(N_{DVI}, W_{et}, L_{ST}, N_{DSI})]\} \quad (2)$$

式中: P_{C1} 表示第 1 主成分, f 为对各指标进行归一化处理。

对 R_{SEI0} 继续进行归一化处理,得到最终的 R_{SEI}

$$R_{SEI} = (R_{SEI0} - R_{SEI0 \min}) / (R_{SEI0 \max} - R_{SEI0 \min}) \quad (3)$$

式中: $R_{SEI0 \max}$ 和 $R_{SEI0 \min}$ 分别代表 R_{SEI0} 的最大值与最小值。 R_{SEI} 取值范围在 $[0,1]$ 之间, R_{SEI} 越接近 1,则说明生态环境质量越好。

2.3 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性及揭示驱动因子的统计学方法,由 4 个探测器组成:因子探测器、交互作用探测器、风险区探测器、生态探测器^[17],目前已被广泛应用于社会科学、环境科学等领域^[18-19]。本研究使用因子探测器、交互作用探测器、生态探测器来进行凉山州生态环境质量驱动因子分析。

因子探测器:用于探测自变量 X 对因变量 Y 的空间分异的解释力 q ,表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{S_{SW}}{S_{ST}} \quad (4)$$

式中: L 为 Y 或 X 的分层数; N_h 和 N 分别为层 h 和全区域内的样本数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区域内 Y 的方差; S_{SW} 为层内方差之和; S_{ST} 为全区总方差; q 的值域为 $[0,1]$, q 越接近 1 则说明该因子对 Y 的解释力越强。

交互作用探测器:用于探测自变量 X_i 之间的交互作用,即测定不同因子的共同作用是否会减弱或增强对因变量 Y 的解释力。评估方法为首先计算单个影响因子的 q 值,再计算 2 个影响因子相互作用后的 q ,最后进行 q 比较,最后可分为 5 类(表 3)。

表 3 交互作用类型

Table 3 Types of the interaction

交互作用类型	判断依据
非线性减弱	$q(x_1 \cap x_2) < \min[q(x_1), q(x_2)]$
单因子非线性减弱	$\min[q(x_1), q(x_2)] < q(x_1 \cap x_2) < \max[q(x_1), q(x_2)]$
双因子增强	$q(x_1 \cap x_2) > \max[q(x_1), q(x_2)]$
独立	$q(x_1 \cap x_2) = q(x_1), q(x_2)$
非线性增强	$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1), q(x_2)$

生态探测器:用于比较不同自变量 X_i 对因变量 Y 的空间分布是否有显著差异,以统计量 F 衡量,表达式如下

$$F = \frac{N_{x1}(N_{x2}-1)S_{SWx1}}{N_{x2}(N_{x1}-1)S_{SWx2}} \quad (5)$$

$$S_{SWx1} = \sum_{h=1}^{L1} N_h \sigma_h^2, S_{SWx2} = \sum_{h=1}^{L2} N_h \sigma_h^2 \quad (6)$$

式中: S_{SWx1} 和 S_{SWx2} 分别代表 2 种自变量 X_1 和 X_2 形成的层内方差之和; N_{x1} 和 N_{x2} 表示 X_1 和 X_2 的样本数。其中零假设 $H_0: S_{SWx1} = S_{SWx2}$,如果在 α 的显著性水平上拒绝 H_0 ,这表明 X_1 和 X_2 对 Y 空间分布的影响存在显著差异。 Y 表示显著差

异, N 代表不存在显著差异。

3 结果与分析

3.1 各指标主成分分析结果

由表 4 可知,2000—2020 年第 1 主成分(PC1)和第 2 主成分(PC2)的 3 期数据对 RSEI 的贡献率均超过 85%,且 4 个指标在 PC2-PC4 中出现指标正负符号变化不定的现象,难以准确说明生态现象;分析 PC1 中各指标的贡献率,得知 NDVI 和 WET 始终为正值指标,而 LST 和 NDBSI 始终为负值指标,说明绿度和湿度对凉山州生态环境质量起促进作用,这亦与实际情况相吻合。综上所述,PC1 既整合了各指标特征信息,又与实际相符,可用于构建凉山州 RSEI 模型。

3.2 凉山州生态环境质量的时空特征

3.2.1 凉山州生态环境质量的时间特征 为更直观反映凉山州生态环境质量,在 ArcGISPro 中对 RSEI 数值以等间距分级法划分为 5 类:差(0~0.2)、较差(0.2~0.4)、一般(0.4~0.6)、良(0.6~0.8)、优(0.8~1),并统计 3 个时期不同生态等级的面积及占比(表 5)。

整体看,2000—2020 年间凉山州生态环境质量变化呈先降后升的状态,RSEI 均值从 2000 年的 0.53 略微下降到 2010 年的 0.51,再增长到 2020 年的 0.55。具体来看,2000—2010 年凉山州生态环境质量有所退化,生态质量为差和较差的总面积占比增加了 6.6%;2010—2020 年凉山州生态环境质量有所改善,差、较差等级的总面积减少了 4 919.34 km²,总占比下降 8.09%。综上所述,凉山州生态环境质量在 2000—2020 年呈现出恢复和逐渐向好趋势。

由图 2、表 6 可见,20 a 间凉山州生态环境质量轻度、明显改善的面积为 24 301.19 km²,占总面积的 41.09%,仅高于生态环境质量轻度、明显恶化的面积 2.5%,可见这一时期凉山州生态环境虽有所改善,但由于恶化与改善的区域面积几乎持平,导致整体生态环境质量变化不大。具体来看,2000—2010 年凉山州生态环境以恶化为主,生态环境质量等级轻度、明显恶化的面积占研究区总面积 41.79%,而生态环境质量改善的面积占比为 34.80%;2010—2020 年凉山州生态环境质量明显提高,生态环境质量等级提高的面积为 28 072.67 km²,面积占比 47.03%,而退化的面积占比为 27.51%,提高的面积比退化的面积多 19.52%。

3.2.1 凉山州生态环境质量的时空特征 从凉山州 RSEI 等级分布来看(图 3),2000—2020 年凉山州生态环境质量等级以一般及以上为主,总面积占

比均超过 60%，差和较差生态等级的区域多集中于凉山州西部的盐源县，南部的会理县、会东县，中部的越西、喜德、昭觉、美姑、普格、布拖、金波、西昌 8 县。2000—2010 年凉山州中部越西、喜德、昭觉、美姑、普格、布拖、金波、西昌 7 县的差和较差生态等级区域明显增多，雷波县生态环境有所好转。与之相反，2010—2020 年凉山州生态等级为差的区域明显减少，多集中于盐源中部较为平坦区域和会理、会东县低海拔区域。

从图 4 来看，2000—2020 年凉山州生态环境退化与改善的面积几乎相等，生态环境恶化的区域多集中于木里、美姑、昭觉、金波、宁南、会理县。2000—2010 年全州生态环境趋于恶化，越西、昭觉、美姑、普格、布拖、金波 6 县最为严重，仅雷波县生态环境得以改善。2010—2020 年凉山州生态环境趋向良好，生态恶化区域多集中于木里县，小部分分布于雷波、宁南、会东县。

表 4 2000—2020 年 4 个指标主成分分析

Table 4 Principal component analysis of four indicators from 2000 to 2020

年份	指标	PC1	PC2	PC3	PC4
2000 年	NDVI	0.504	0.620	0.467	0.376
	WET	0.511	−0.256	−0.631	0.523
	LST	−0.434	0.705	−0.551	0.104
	NDBSI	−0.544	−0.228	0.279	0.757
	特征值	0.230	0.043	0.031	0.006
	特征值贡献率	73.82%	13.95%	10.13%	2.10%
2015 年	NDVI	0.503	0.531	0.592	−0.336
	WET	0.522	−0.165	−0.616	−0.565
	LST	−0.431	0.778	−0.425	−0.163
	NDBSI	−0.536	−0.288	0.297	−0.735
	特征值	0.264	0.041	0.028	0.005
	特征值贡献率	77.82%	12.08%	8.37%	1.73%
2020 年	NDVI	0.540	0.054	0.719	−0.431
	WET	0.519	0.180	−0.688	−0.473
	LST	−0.368	0.904	0.092	−0.194
	NDBSI	−0.549	−0.382	−0.038	−0.743
	特征值	0.187	0.027	0.013	0.003
	特征值贡献率	80.86%	11.91%	5.94%	1.28%

表 5 2000—2020 年凉山州生态质量等级与面积统计

Table 5 Statistics of ecological quality grade and area of Liangshan Prefecture from 2000 to 2020

RSEI 等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	比例(%)	面积/km ²	比例(%)	面积/km ²	比例(%)
差[0~0.2]	9 585.80	16.13	12 348.82	20.57	6 474.04	10.82
较差[0.2~0.4]	10 246.39	17.24	11 648.45	19.40	12 603.91	21.06
一般[0.4~0.6]	13 322.48	22.42	11 106.11	18.50	13 185.32	22.03
良[0.6~0.8]	13 174.74	22.17	11 518.68	19.19	15 126.46	25.27
优[0.8~1]	13 103.24	22.05	13 417.16	22.35	12 459.81	20.82
RSEI 均值	0.53		0.51		0.55	

从图 5A 来看，人类活动区域常分布在低海拔及较平坦地区，因而高程小于 2 244 m 的地区 RSEI 均值相对较低，最低仅有 0.368。2 244~4 624 m 区间内由于人类活动干扰较少，植被较为茂盛，生态环境质量较高，RSEI 均值最高可达到 0.693。而在高程>4 624 m 的区域，植物难以生存，因此 RSEI 均值有所下降。

从坡度分布来看(图 5B)，2000—2020 年凉山

州生态环境质量均随着坡度增加呈现出好转的趋势，并在 39°~51° 区间 RSEI 均值达到最高值 0.627、0.61、0.619。而坡度<6°的区域由于受人类活动干扰较大，RSEI 均值较低。

从坡向分布来看(图 5C)，RSEI 均值随坡向变化较大，可排列为：正北>正南、正西>正东、西北>东南、东北>东南，其中 RSEI 均值在正北时达到最高值 0.6。

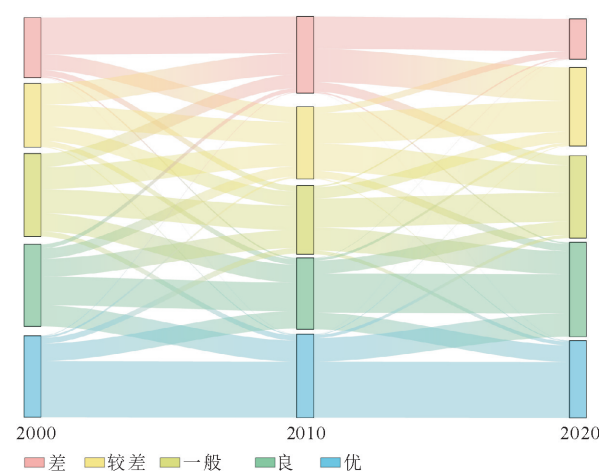


图 2 凉山州 2000—2020 年生态环境质量等级转移矩阵桑基图

Fig. 2 Sankey diagram of ecological environment quality grade transfer matrix of Liangshan Prefecture from 2000 to 2020

3.3 生态环境质量影响因素探测分析

3.3.1 单因子探测分析 利用地理探测器中的因子探测器来探析各因子对 RSEI 空间分异的解释力,具体步骤如下:1)以湿度指标、绿度指标、干度指标、热度指标、高程、坡度、经济密度、人口密度、土地利用类型 9 个因子作为自变量 X_i ,通过自然断点法分为 6 类;2)在 ArcGIS Pro 中生成 $4\text{ km}\times 4\text{ km}$ 的渔网并与研究区相交,共均匀形成 4 097 个点;3)以 RSEI 模型作为因变量,9 个指标为自变量因子,运用 Excel 2019 软件中地理探测器插件进行单因子探测分析(表 7)结果发现,9 个因子的 p 均为 0,这表明各因子对 RSEI 的空间分异解释力充足;模型结构因子对 RSEI 空间分异的解释力最强,其中干度指标的 q 高达 0.88,说明建筑用地和裸土面积对该研究区生态环境质量影响较大,人口密度因子对 RSEI 的空间分异解释力最弱, q 为 0.02;整

表 6 2000—2020 年凉山州生态等级变化情况

Table 6 Changes in the ecological grade of Liangshan Prefecture from 2000 to 2020

RSEI 变化类别	2000—2010 年		2010—2020 年		2000—2020 年	
	面积/ km^2	比例(%)	面积/ km^2	比例(%)	面积/ km^2	比例(%)
明显恶化	934.95	1.58	160.60	0.27	452.34	0.76
轻度恶化	23 836.84	40.21	16 261.82	27.25	22 369.32	37.82
基本不变	13 877.99	23.41	15 192.17	25.45	12 024.30	20.33
轻度改善	20 256.54	34.17	27 788.66	46.56	23 222.87	39.26
明显改善	375.64	0.63	284.01	0.48	1078.32	1.82

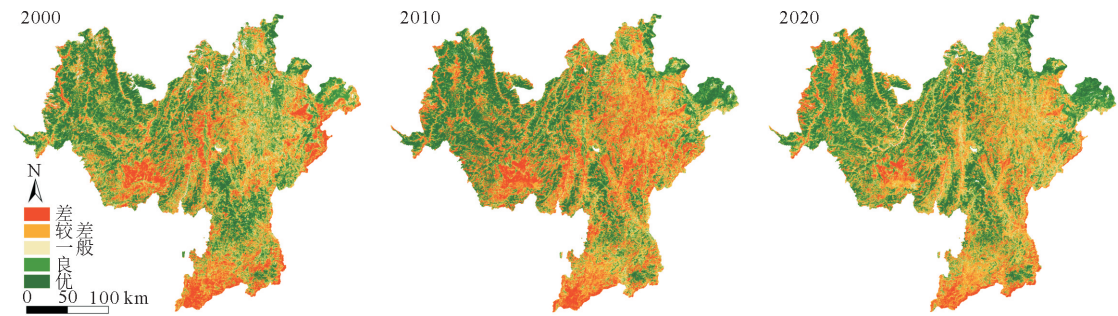


图 3 2000—2020 年凉山州 RSEI 等级分布

Fig. 3 Distribution of RSEI ratings in Liangshan Prefecture from 2000 to 2020

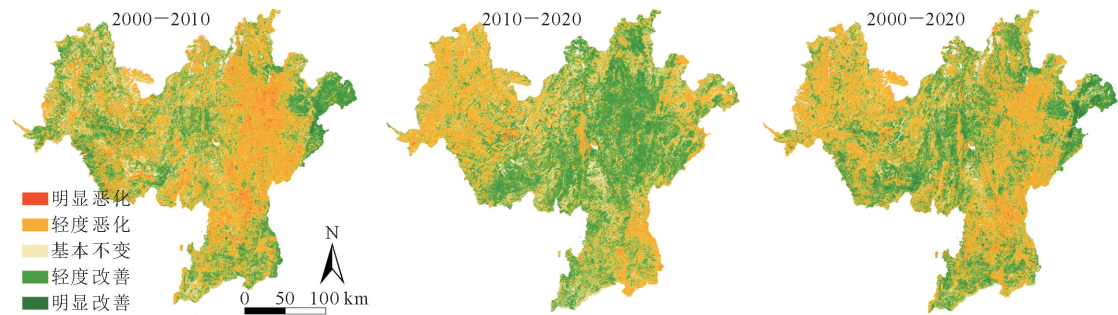


图 4 凉山州 2000—2020 年生态环境质量变化空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of the changes in the ecological environment quality of Liangshan Prefecture from 2000 to 2020

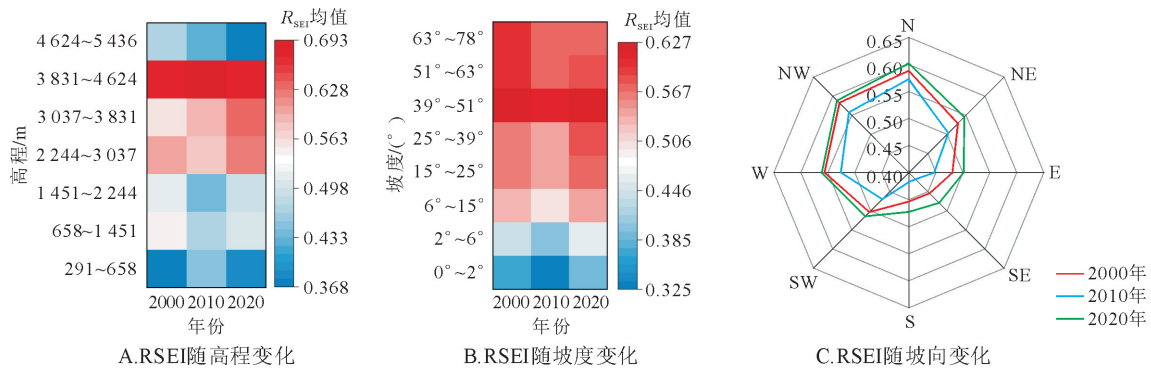


图 5 RSEI 地形分布分区统计

Fig. 5 Terrain zoning statistics of RSEI

表 7 单因子探测结果

Table 7 The results of single factor detection

因子	q	p	q 排序
湿度指标	0.83	0.000	3
绿度指标	0.86	0.000	2
干度指标	0.88	0.000	1
热度指标	0.52	0.000	4
高程	0.07	0.000	6
坡度	0.07	0.000	7
经济密度	0.04	0.000	8
人口密度	0.02	0.000	9
土地利用类型	0.14	0.000	5

体来看,各因子影响力排序为:干度指标>绿度指标>湿度指标>热度指标>土地利用类型>高程>坡度>经济密度>人口密度。

3.3.2 因子交互作用分析 利用地理探测器中的

交互作用探测器、生态探测器来研究各因子间的交互作用及对 RSEI 的空间分布是否有显著差异,结果见图 6。结果表明,各因子在相互作用后,均对研究区 RSEI 空间分异的影响力明显增强,其中双线性增强的影响模式出现 32 次,非线性增强的影响模式出现 4 次;热度指标∩干度指标($q=0.96$)对凉山州 RSEI 空间分异具有最强解释力,说明干度指标在热度指标的交互作用下表现出更强的解释力,这亦与实际情况相符,另外,人口密度作为单因子探测时,其对 RSEI 空间分异解释力较低($q=0.02$),但在与土地利用类型因子的交互作用下,解释力可达到 0.149;湿度指标∩热度指标、绿度指标∩高程、热度指标∩土地利用类型等 29 对交互因子组合的生态探测结果为 N,说明这些因子组合对 RSEI 空间分异的影响不具有显著性差异。

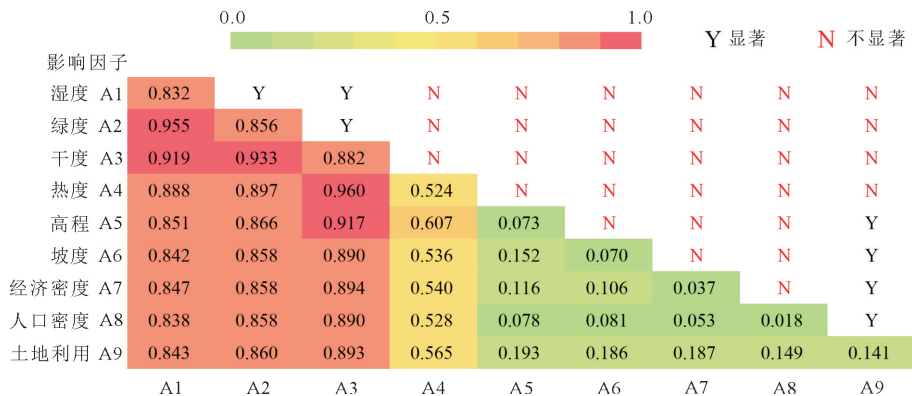


图 6 生态探测与交互探测矩阵

Fig. 6 Eco-detection and interactive detection matrix

4 结论与讨论

4.1 结论

2000—2020 年凉山州生态环境质量呈“先降后升”趋势,RSEI 均值从 0.53(2000 年)下降到 0.51(2010 年),再上升至 0.55(2020 年)。各年份生态等级以一般及以上为主,总面积占比分别为

66.63%、60.03%、68.12%。20 a 间凉山州生态环境质量恶化与改善的区域面积几乎持平,分别占 38.59%、41.09%。

从空间分布特征来看,生态等级为“差”和“较差”的区域多集中于凉山州西部的盐源县,南部的会理县、会东县,中部的越西、喜德、昭觉、美姑、普格、布拖、金波、西昌 8 县。20 a 间凉山州生态环境质量

恶化与改善的区域面积几乎持平,分别占 38.59%、41.09%,生态恶化区域以木里县为主。其中海拔 3 831~4 624 m、坡度 39°~51°和坡向为正北的区域,是生态环境质量最佳区域,RSEI 均值均超过 0.6。

单因子探测结果显示干度值对凉山州生态环境质量影响最强,具体驱动力排名为干度指标>绿度指标>湿度指标>热度指标>土地利用类型>高程>坡度>经济密度>人口密度,各因子在相互作用后对 RSEI 模型的影响均得到不同程度增强,其中热度指标∩干度指标对凉山州 RSEI 空间分异的解释力高达 0.96。

4.2 讨论

利用 GEE 平台耦合 4 个生态因子指标构建凉山州 2000—2020 年 RSEI 模型。从主成分分析结果来看,绿度、湿度指标均为正指标,干度、热度指标均为负指标,这亦与实际情况相吻合。此外,虽然 GEE 平台会自动检测研究区内云阴影并填补上同年无云影像,但由于凉山州地处暖温带湿润气候区,夏半年云雨较多,冬半年温暖少雨,全年无云影像时间段不固定,最后拼贴得到的 RSEI 模型精度难免会受到一定影响。

在凉山州 RSEI 等级分布图中,可以观察到生态环境质量较差区域还分布在山脉间河谷处,这可能是因为凉山州的横断山脉大多呈南北走向,而来自印度洋的暖洋气流呈西北—东北走向,气流越过山脊后变得炎热干燥,进而形成焚风效应^[20],这不仅加大了森林火险,亦造就了凉山州亚热带干热河谷稀疏草原景观,因此凉山州山脉间的河谷生态环境质量较差。

在统计凉山州 2000—2020 年生态环境质量变化面积时发现,研究区生态环境质量恶化与改善的面积几乎相等,而恶化的区域除了低海拔的人类聚居地,还出现在高海拔地区,该结果与人们认为高山地区由于受人类活动干扰较少而恢复较快有所差异。这可能因为大部分植物难以生存在海拔 4 000 m 以上的高山地带,生态环境脆弱,加上凉山州近年气候多变,平均气温趋于上升,而降水量总体变化不大,加剧了高原地带生态环境的严峻性,反观处于低海拔和高海拔之间的区域生态恢复程度较好。

在对凉山州生态环境质量影响因素进行探测分析时,个别因子(如人口密度)作为单因子时对 RSEI 解释力较低,但在与其他因子交互作用下表现出更强的解释力,特别是土地利用类型∩干度指标的组合,交互作用后 q 达到 0.893,这说明土地利用类型作为单因子时对 RSEI 模型影响力并不强,但土地

利用类型、建筑用地和裸土面积却是影响生态环境质量的主要因素,这一结论与宋慧敏等^[21]的研究结论相符,同时也说明了未来地理探测器的运用应单因子探测与多因子间交互作用探测器相互配合,仅凭其因子探测器不足以得到准确结果。

参考文献:

- [1] 许力飞. 我国城市生态文明建设评价指标体系研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- [2] 白夜, 王博, 武英达, 等. 凉山州森林火灾形成的火环境研究[J]. 林业资源管理, 2020(5): 116-122.
- [3] 胡尧. 基于 MODIS 数据的森林火灾遥感监测方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [4] 王文锦, 王卿, 朱安生, 等. 2000—2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3442-3450.
- [5] 张云芝, 胡云锋, 韩月琪, 等. 全球主要生态退化区和研究热点区的空间分布与演变[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7599-7613. ZHANG Y Z, HU Y F, HAN Y Q, *et al.* Spatial distributions and evolutions of global major ecological degradation regions and research hotspot regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7599-7613. (in Chinese)
- [6] 杨泽康, 田佳, 李万源, 等. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7627-7636. YANG Z K, TIAN J, LI W Y, *et al.* Spatio-temporal pattern and evolution trend of ecological environment quality in the Yellow River basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7627-7636. (in Chinese)
- [7] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862. XU H Q. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853-7862. (in Chinese)
- [8] 潘洪义, 李加安, 张琴. 基于 RSEI 的地震区生态环境质量恢复研究——以汶川县为例[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(3): 745-757. PAN H Y, LI J A, ZHANG Q. Study on restoration of ecological environment quality in earthquake area based on RSEI——a case study of Wenchuan County [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(3): 745-757. (in Chinese)
- [9] 刘小燕, 崔耀平, 董金玮, 等. 黄河中下游影响区生态空间和生态指数变化评估[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 8030-8039. LIU X Y, CUI Y P, DONG J W, *et al.* Assessment of ecological space and ecological index changes in the affected area of the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 8030-8039. (in Chinese)
- [10] 苏朔, 宫兆宁, 张文静, 等. 北运河流域植被覆盖度变化及其生态环境质量评估[J]. 环境科学学报, 2022, 42(1): 19-27. SU S, GONG Z N, ZHANG W J, *et al.* Change of vegetation coverage and assessment of ecological environment quality in Beiyun River Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(1): 19-27. (in Chinese)

- (9):142-148. (in Chinese)
- [13] 范慧. 建筑楼面板用重组竹材关键制备技术研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018: 25.
- [14] 李晖, 吕黄飞, 陈美玲. 阻燃处理竹丝装饰材的热解及燃烧特性[J]. 林业工程学报, 2018, 3(3): 12-17.
- LI H, LÜ H F, CHEN M L. Pyrolysis and combustion characteristics of flame retardant treated decorative bamboo filament[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(3): 12-17. (in Chinese)
- [15] GAUSS C, KADIVAR M, HARRIES K A. Chemical modification of *Dendrocalamus asper* bamboo with citric acid and boron compounds: effects on the physical-chemical, mechanical and thermal properties[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 1-16.
- [16] 陈博, 房轶群, 司月月. 胶合板表面层层自组装聚磷酸铵-壳聚糖/氮化硼及其阻燃性能[J]. 复合材料学报, 2021, 38(4): 1252-1261.
- CHEN B, FANG Y Q, SI Y Y. Flame retardancy of ammonium polyphosphate-chitosan/boron nitride on plywood surface via layer-by-layer self-assembly method [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2021, 38(4): 1252-1261. (in Chinese)
- [17] 卢金汉, 姜鹏, 陈志林. 基于 3 种评价方法的阻燃刨花板燃烧特性分析 [J]. 林业工程学报, 2020, 5(5): 28-34.
- LU J H, JIANG P, CHEN Z L. Characteristic analysis of flame retardant particleboard using three methods of combustion performance evaluation [J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(5): 28-34. (in Chinese)
- [18] ZHAO P, GUO C, LI L. Exploring the effect of melamine pyrophosphate and aluminum hypophosphite on flame retardant wood flour/polypropylene composites[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 193-199.
- [19] LU J, JIANG P, CHEN Z. Flame retardancy, thermal stability, and hygroscopicity of wood materials modified with melamine and amino trimethylene phosphonic acid[J]. Construction and Building Materials, 2021, 267: 1-12.
- [20] 周中玺. 水基型阻燃剂阻燃处理竹材的主要性能研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018: 47.
- [21] 杜春贵, 余辉龙, 周中玺. 阻燃毛竹重组竹地板的阻燃特性[J]. 林产工业, 2017, 44(2): 7-11.
- DU C G, YU H L, ZHOU Z X. Fire-resistant properties of fire-retardant moso bamboo scrimber flooring[J]. China Forest Products Industry, 2017, 44(2): 7-11. (in Chinese)
- [22] WANG S, ZHANG L, SEMPLÉ K. Development of biodegradable flame-retardant bamboo charcoal composites, Part II: thermal degradation, gas phase, and elemental analyses [J]. Polymers, 2020, 12: 2238-2253.
- [23] 李任. 阻燃重组竹的制备工艺与燃烧特性研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014: 35.
- [24] 司月月, 陈博, 慕春霖. CS/h-BN/APP 层层自组装涂层阻燃杨木的研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4): 984-992.
- SI Y Y, CHEN B, MU C L. Effect of CS/h-BN/APP coating by LBL technology on flame-retardant poplar[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 984-992. (in Chinese)

(上接第 145 页)

- [11] 孟丹, 刘玲童, 宫辉力, 等. 京杭大运河沿线地区城市化与生态环境耦合协调关系研究[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(4): 162-172.
- [12] 郭城, 陈颖彪, 郑子豪, 等. 顾及时空背景的遥感生态指数适用性分析——以粤港澳大湾区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(5): 23-30.
- GUO C, CHEN Y B, ZHENG Z H, *et al.* Applicability analysis of remote sensing ecological index considering temporal and spatial background——taking Guangdong, Hong Kong and Macao Bay Area as an example[J]. Geography and Geo-Information Science, 2021, 37(5): 23-30. (in Chinese)
- [13] 陈炜, 黄慧萍, 田亦陈, 等. 基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1382-1391.
- [14] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, *et al.* Google earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18-27.
- [15] XIONG Y, XU W H, LU N, *et al.* Assessment of spatial-temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: a case study in Erhai lake basin, Yunnan Province, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107518.
- [16] 张华, 宋金岳, 李明, 等. 基于 GEE 的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1883-1894.
- ZHANG H, SONG J Y, LI M, *et al.* Eco-environmental quality assessment and cause analysis of Qilian Mountain national park based on GEE[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1883-1894. (in Chinese)
- [17] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese)
- [18] DU Z, XU X, ZHANG H, *et al.* Geographical detector-based identification of the impact of major determinants on aeolian desertification risk[J]. PLoS One, 2016, 11(3): e151331.
- [19] LIANG P, YANG X P. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) sandy land, northern China and their impact factors[J]. Catena, 2016, 145: 321-333.
- [20] 黄传响, 崔秋华. 攀枝花干热河谷区森林火灾特征及对策初探[J]. 绿色科技, 2019(7): 116-118.
- [21] 宋慧敏, 薛亮. 基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3913-3919.
- SONG H M, XUE L. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Weinan City, Northwest China based on RSEI model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 3913-3919. (in Chinese)